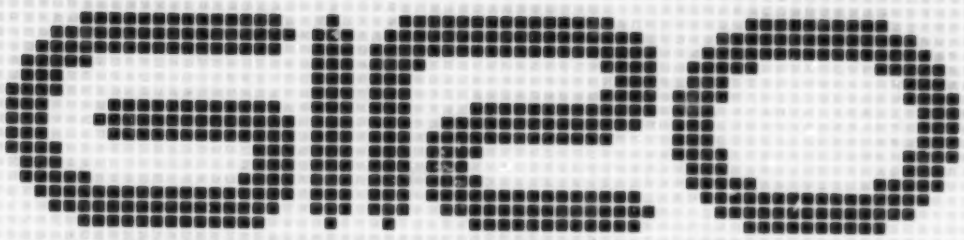


LE GROUPE EN INFORMATIQUE ET RECHERCHE OPERATIONNELLE

CA1
DTC800-
86
G35
v.2

41.D

Library and Information Centre / Centre de Documentation
RECEIVED - REÇU LE
JUL 4 1990
Transport Canada / Transports Canada

CA1
DTC800-
86
G35
v.2

423817

41.D

90-07201/

TP6778F

GIRO/SOF: Logiciel de simulation des opérations ferroviaires au Port de Montréal

Modèle de simulation

par
GIRO inc.

Mars 1986

Préparé pour le

Centre de développement des transports
Transports Canada

423817

DDN 423515

AVERTISSEMENT

Les opinions et les vues exprimées dans ce rapport sont celles du ou des auteurs (ou du contractant) et ne reflètent pas nécessairement celles du Centre de développement des transports, Transports Canada.

An English summary of this report is included immediately preceding the table of contents.

EQUIPE DE RECHERCHE

L'équipe de recherche de GIRO Inc. se composait de:

- Jean-Yves Blais, M.Sc., Président et chargé de compte;
- Michel Bienvenu, M.Sc., Chargé de projet et analyste;
- Pierre Trudeau, M.Sc., Analyste;
- Renée Coté, D.E.C., Programmeur;
- Michel Simard, B.Sc., Programmeur;
- Edward R. Petersen, Ph.D., Conseiller en opérations ferroviaires, Queen's University, Kingston, Ontario.

FORMULE DE DOCUMENTATION POUR RAPPORT

1. N° du rapport Transports Canada	2. N° de l'étude — CDT	3. N° de catalogue du destinataire
TP6778F	6329	

4. Titre et sous-titre	5. Date du rapport
GIRO/SOF Logiciel de simulation des opérations ferroviaires au Port de Montréal: Modèle de simulation	Mars 1986
	6. N° du rapport de l'organisme exécutant

7. Auteur(s)	8. N° de dossier Transports Canada
GIRO Inc./Le Groupe en Informatique et Recherche Opérationnelle	D1465-447

9. Nom et adresse de l'organisme exécutant	10. N° de dossier — ASC
GIRO Inc./Le Groupe en Informatique et Recherche Opérationnelle 1100, boulevard Crémazie est, bureau 300 Montréal, Québec H2P 2X2	11SD.T8200-4-4550
	11. N° de contrat — ASC ou Transports Canada OS-D84-00268

12. Nom et adresse de l'organisme parrain	13. Genre de rapport et période visée
Centre de développement des transports (CDT) Complexe Guy Favreau 200, boulevard Dorchester ouest, Tour ouest, bureau 601 Montréal, Québec H2Z 1X4	14. Code de l'organisme parrain

15. Remarques additionnelles	16. Agent de projet — CDT
	Catherine Hirou

17. Résumé

Le logiciel GIRO/SOF (Simulation d'Opérations Ferroviaires dans un port) est un outil de planification ferroviaire dans un contexte portuaire. Il est composé de deux parties: la gestion des scénarios de planification et la simulation des scénarios.

Le logiciel a été développé dans le contexte du Port de Montréal. Cependant son haut niveau de paramétrisation des scénarios et son haut niveau de détail du simulateur en permettent l'utilisation dans le contexte d'autres ports. Le logiciel est programmé pour être utilisé sur micro-ordinateur.

Ce manuel est le deuxième d'une série de deux manuels complémentaires. Il est axé sur la philosophie du modèle de simulation ainsi que sur ses aspects techniques.

Le premier manuel intitulé " GIRO/SOF Logiciel de simulation des opérations ferroviaires au Port de Montréal: Manuel d'utilisation" décrit les méthodes d'utilisation du logiciel.

18. Mots-clés	19. Diffusion
Programme, simulation, port, opérations ferroviaires, gestion, planification	Un nombre limité de copies est disponible au Centre de développement des transports (CDT).

20. Classification de sécurité (de ce rapport)	21. Classification de sécurité (de cette page)	22. Nombre de pages	23. Prix
Non classifié	Non classifiée	xii, 48	

CDT/TDC 79-005

REPORT DOCUMENTATION FORM

1. Transport Canada Report No.	2. TDC Project No.	3. Recipient's Catalogue No.
TP6778F	6329	

4. Title and Subtitle	5. Report Date
GIRO/SOF Logiciel de simulation des opérations ferroviaires au Port de Montréal: Modèle de simulation	March 1986
	6. Performing Organization Report No
7. Author(s)	8. Transport Canada File No.
GIRO Inc./Le Groupe en Informatique et Recherche Opérationnelle	D1465-447
9. Performing Organization Name and Address	10. DSS File No.
GIRO Inc./Le Groupe en Informatique et Recherche Opérationnelle 1100 Cremazie East, Suite 300 Montreal, Quebec H2P 2X2	11SD-T8200-4-4550
	11. DSS or Transport Canada Contract No
	OS-D84-00268
12. Sponsoring Agency Name and Address	13. Type of Report and Period Covered
Transportation Development Centre (TDC) Guy Favreau Complex 200 Dorchester Blvd West Montreal, Quebec H2Z 1X4	
	14. Sponsoring Agency Code
15. Supplementary Notes	16. TDC Project Officer
	Catherine Hirou

17. Abstract

The GIRO/SOF program (Simulation des opérations ferroviaires) is a tool for planning railway operations in a port. It has two parts: the management of scenarios used in planning, and the simulation of these scenarios.

The program was developed with the Port de Montreal in mind, but its highly parameterized scenarios and detailed simulator make it suitable for use in other ports. The program is to be run on a microcomputer.

This is the second of two complementary manuals. It explains the philosophy behind the simulation model and provides some technical details.

The first manual, " GIRO/SOF Logiciel de simulation des opérations ferroviaires au Port de Montréal: Manuel d'utilisation" , explains how to use the program.

18. Key Words	19. Distribution Statement
Program, simulation, rail operations, port, management, planning	A limited number of copies are available from the Transportation Development Centre.

20. Security Classification (of this report)	21. Security Classification (of this page)	22. No. of Pages	23. Price
Unclassified	Unclassified	xii, 48	

TDC CDT 79-005

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Messieurs Jean-Pierre Desjardins, Georges Gagné et Gilles Saint-Jean ainsi que toutes les autres personnes au Port de Montréal qui nous ont apportées leur collaboration durant ce projet.

SOMMAIRE

Le Port de Montréal opère un réseau ferroviaire d'une longueur voisine de 100 km reliant les réseaux nationaux du CN et du CP aux différents postes à quai, terminaux, hangars et industries localisés sur le site portuaire. A ce niveau, le rôle du Port consiste essentiellement à coordonner et à réaliser, à l'aide de ses propres locomotives, les déplacements des wagons du CN et du CP entre les clients portuaires et les réseaux nationaux.

Au cours des récentes années (75-85), le trafic de marchandise constitué à 85% de conteneurs, a considérablement augmenté au Port. Le réseau ferroviaire n'ayant pas été prévu à l'origine pour desservir un tel volume de marchandise, cette augmentation mettait en péril l'avantage concurrentiel du Port, dû principalement au court délai de transition de la marchandise. Les prévisions de trafic étant à la hausse, le Port se devait d'améliorer la capacité de son réseau.

En raison des coûts inhérents à la construction de voies ferrées et en raison de l'espace restreint disponible, il se devait de planifier avec soin tout changement à l'infrastructure du réseau de façon à maximiser l'utilité résultante. Afin d'évaluer a priori les conséquences des divers scénarios de modifications envisagés, il fut décidé de créer un logiciel de simulation des opérations ferroviaires qui permettrait de réaliser ces évaluations.

Le logiciel GIRO/SOF développé permet de paramétriser des scénarios d'infrastructures et des modes d'opération complexes puis de reproduire (simuler) les opérations ferroviaires comme si elles survenaient en réalité dans l'environnement défini par les paramètres. Il fournit des résultats qui permettent d'évaluer les conséquences des modifications pour ainsi déterminer les plus profitables à court, moyen et long terme.

SUMMARY

The Port of Montreal operates a railway system of about 100 kilometers, linking the national CN and CP networks to the various berths, terminals, sheds and industries located in the Port. The role of this railway system is essentially to co-ordinate rail traffic at the port, using the port's locomotives to move CN and CP cars between port customers and the national rail networks.

In recent years (1975-1985), the Port's goods traffic, of which 85% is containers, has increased substantially. Since the rail network was not originally designed to handle such volumes, this increase threatened the Port's competitive advantage, which was mainly due to its efficient cargo-handling services. And since even greater volumes are expected, the Port is obliged to boost the capacity of its rail network.

Owing to the cost of railway construction and the limited space available, any changes to the infrastructure of the rail system must be planned with care in order to maximize their effectiveness. It was decided that a railway operations simulation program should be designed to evaluate the consequences of the various changes under consideration before their implementation.

The GIRO/SOF program enables users to develop complex scenarios involving various infrastructure and operating mode parameters, and to simulate railway operations defined by these scenarios. The results of these simulations can be used to evaluate the consequences of any changes and determine their short-, medium- and long-term benefits.

TABLE DES MATIERES

1.	INTRODUCTION		1
2.	SCHEMA GENERAL DE LA SIMULATION		3
	2.1	Notion d'événement	3
	2.2	Schéma simplifié de la simulation	4
	2.3	Conditions initiales	6
	2.4	Enumération des événements possibles et des grandes lignes de leur analyse	7
	2.4.1	Evénement 'ALP'	7
	2.4.2	Evénement 'ARC'	8
	2.4.3	Evénement 'DCS'	9
	2.4.4	Evénement 'DDI'	10
	2.4.5	Evénement 'DLP'	10
	2.4.6	Evénement 'DPC'	11
	2.4.7	Evénement 'DQT'	11
	2.4.8	Evénement 'EDC'	12
	2.4.9	Evénement 'FDI'	13
	2.4.10	Evénement 'FPC'	13
	2.4.11	Evénement 'FQT'	13
	2.4.12	Evénement 'JOU'	14
	2.4.13	Evénement 'RPS'	15
	2.5	Fin de la simulation	16
3.	DESCRIPTION DES PRINCIPAUX MODULES DE LA SIMULATION		18
	3.1	Déplacement des convois sur le réseau	18
	3.1.1	Introduction	18
	3.1.2	Particularités du réseau ferroviaire	18
	3.1.3	Approximation du temps de déplacement	19
	3.2	Temps de tri	20
	3.2.1	Introduction	20
	3.2.2	Approximation du temps de tri	20
	3.3	Gestion des wagons vides	21
	3.3.1	Comment opèrent les compagnies ferroviaires	21
	3.3.2	Modélisation	22
	3.4	Affectation du travail aux équipes de train	23
	3.4.1	Introduction	23
	3.4.2	Algorithme	25
	3.5	Réseau ferroviaire	26

TABLE DES MATIERES
(suite)

3.5.1	Noeuds	26
3.5.2	Tronçons	28
3.5.3	Voies ferrées	29
3.6	Gestion des clients	29
3.6.1	Périodes et stratégie d'opération chez les clients	30
3.6.2	Principe de simulation des clients	33
3.6.3	Manoeuvres de déchargement	35
3.6.4	Gestion de l'import et de l'export	36
3.6.5	Gestion des voies de chargement	36
3.6.6	Commande de wagons	37
3.7	Génération de bateaux	39
3.7.1	Heure d'arrivée	39
3.7.2	Volumes de marchandise	40
3.8	Génération de convois d'export	41
3.8.1	Nombre de convois et caractéristiques	42
3.8.2	Répartition des clients dans les convois	44
3.8.3	Répartition des wagons	44
3.8.4	Déterminer le nombre de blocs-clients par convoi	45
3.8.5	Construction des convois	45

4. CONCLUSIONS 47

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Schéma simplifié de la simulation	5
Figure 2	Structure informatique représentant le réseau ferroviaire	27
Figure 3	Périodes de la stratégie d'opération chez les clients	31
Figure 4	Méthode de rattrapage des clients	34
Figure 5	Relation entre la génération des bateaux et la répartition des wagons d'export	42

1. INTRODUCTION

Le logiciel GIRO/SOF (Simulation d'Opérations Ferroviaires dans un port) est un outil de planification ferroviaire dans un contexte portuaire. Il est composé de deux parties: la gestion des scénarios de planification et la simulation des scénarios.

La gestion des scénarios de planification permet à l'utilisateur de décrire et de gérer les paramètres qui influencent les opérations. Ces paramètres sont regroupés par affinité en six groupes distincts:

1. le réseau ferroviaire constitué des voies ferrées;
2. les quarts de travail constitués des personnes qui opèrent les locomotives;
3. les locomotives appartenant au port;
4. les wagons et leurs caractéristiques;
5. les compagnies ferroviaires qui fournissent les wagons;
6. les clients portuaires qui font l'import/export de leur marchandise par l'intermédiaire du réseau ferroviaire portuaire.

La simulation des scénarios permet de reproduire l'ensemble des opérations ferroviaires et des décisions comme si elles se produisaient réellement en fonction des paramètres décrits dans un scénario. Le simulateur fournit pour chaque simulation une série de rapports qualitatifs et quantitatifs qui permettent à l'utilisateur d'évaluer les performances du système ferroviaire dans le contexte du scénario. Par comparaison des résultats de simulation de divers scénarios, l'utilisateur est en mesure d'évaluer les scénarios les plus performants. Il connaît ainsi, à l'avance, les meilleures façons de modifier les infrastructures et les modes d'opération ferroviaire de façon à atteindre les objectifs de développement fixés.

Le logiciel a été développé dans le contexte du Port de Montréal. Cependant son haut niveau de paramétrisation des scénarios et son haut niveau de détail du simulateur en permettent l'utilisation dans le contexte d'autres ports.

Il est programmé entièrement en FORTRAN 77 pour être utilisé sur un micro-ordinateur de type IBM XT ou de type IBM AT.

Ce manuel est le deuxième d'une série de deux manuels complémentaires. Il est axé sur la philosophie du modèle de simulation ainsi que sur ses aspects techniques.

Le premier manuel intitulé "GIRO/SOF Logiciel de simulation des opérations ferroviaires au Port de Montréal: Manuel d'utilisation" décrit les méthodes d'utilisation du logiciel.

2. SCHEMA GENERAL DE LA SIMULATION

2.1 Notion d'événement

La pierre angulaire de la simulation est la notion d'événement. Dans le contexte d'une simulation, un événement est un phénomène qui survient à un moment dans le temps, et qui, de par sa nature, nécessite et déclenche tout un processus d'analyse qui vise à évaluer son impact. Cet impact peut prendre trois aspects:

1) l'événement peut modifier l'état du système.

   Par état du système on entend le statut de chacune des composantes entrant dans la modélisation. La description de chaque convoi, là où en est rendu le déchargement d'un bateau et le nombre de wagons vides disponibles sur le réseau (par compagnie ferroviaire) sont quelques-unes de ces composantes. L'entrée d'un convoi sur le réseau, par exemple, est un événement modifiant l'état du système:

   - il ajoute un convoi à la liste des convois reposant sur le réseau;
   - il augmente le nombre de wagons pour exportation des clients du port représentés dans le convoi;
   - il augmente, possiblement, le nombre de wagons vides disponibles.

2) l'événement peut nous amener à prendre des décisions.

   De par les changements qu'il suscite, un événement peut en effet rendre possible des processus qui avaient été suspendus. Ainsi l'entrée d'un convoi au port peut, par les nouveaux wagons qu'il rend disponible, permettre de répondre à la demande d'un client qui avait été suspendue faute de "matière première". De même, le début d'un quart de travail permet l'utilisation d'une nouvelle équipe de train. Il est alors nécessaire d'examiner les commandes des

clients non encore allouées dans le but de constituer un ordre, c'est-à-dire une suite de commandes que l'équipe de travail devra compléter.

3) l'événement peut induire de nouveaux événements.

L'occurrence d'un événement, du seul fait qu'il est maintenant survenu, peut rendre certaine l'apparition d'autres événements dans le futur. Par exemple, le début d'un quart de travail rend connu le moment le plus tôt auquel l'équipe de train pourra débuter sa pause café ou son dîner.

Notons qu'un même événement peut avoir un effet dans un ou plusieurs des trois aspects possibles décrits ci-dessus.

2.2 Schéma simplifié de la simulation

La mécanique de la simulation peut s'exprimer simplement à partir de la notion d'événement. Bien que fort simplifiée, cette représentation permet de saisir l'essentiel.

Cette mécanique est la suivante:

- générer les événements dont on sait qu'ils surviendront dans le futur;
- les trier et les mémoriser par ordre chronologique;
- les analyser dans l'ordre de leur appararition, c'est-à-dire évaluer leur impact quant aux trois aspects possibles décrits plus tôt;
- répéter le processus aussi longtemps que dure la simulation.

La figure 1 illustre ce principe.

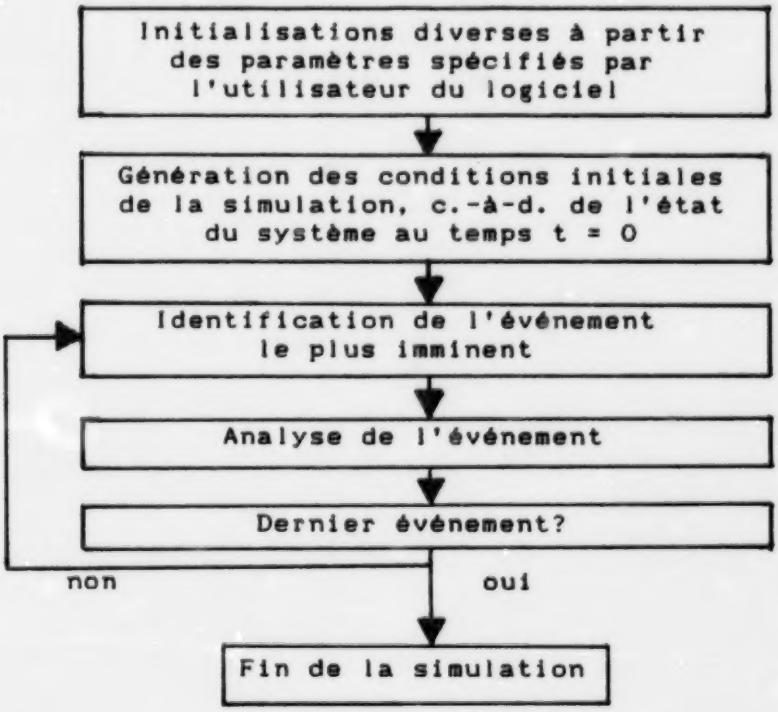


Figure 1 Schéma simplifié de la simulation

Le premier bloc de la figure 1 concerne l'interaction de l'utilisateur avec le logiciel. Toute cette procédure est décrite au document intitulé: "GIRO/SOF Logiciel de simulation des opérations ferroviaires au Port de Montréal: Manuel d'utilisation". Les autres blocs de cette figure sont explicités dans la suite de ce manuel.

2.3 Conditions initiales

Après que l'utilisateur ait spécifié le contexte dans lequel il désirait que la simulation se déroule, l'étape suivante, comme l'indique la figure 1, est l'énumération des conditions initiales, c'est-à-dire l'état du système au début de la simulation, soit au temps zéro (t=0).

En raison du très grand nombre de paramètres qu'il faudrait spécifier, mais surtout de l'interdépendance de tous les éléments en jeu, il aurait été très difficile de donner "instantanément" l'état initial de chaque élément. Pour contourner ce problème, un artifice est utilisé. Celui-ci simplifie grandement le travail, tout en étant plus précis que toute méthode de génération "instantanée". On laisse donc le logiciel faire ce qu'il sait faire de mieux, soit simuler, pour bâtir progressivement les conditions initiales.

Au départ:

- aucun wagon n'est présent sur le réseau;
- aucun bateau n'est à quai;
- aucune commande n'a été passée par un client ou par le port;
- toutes les équipes de train en service sont donc inoccupées.

Puis, en accord avec les paramètres entrés, les premiers bateaux et convois arrivent et amènent graduellement le réseau à un niveau normal d'achalandage. Il va sans dire que les premières journées simulées ne sont pas représentatives de la réalité en raison d'un réseau trop peu occupé. Ces jours sont donc écartés de la simulation et seuls les suivants sont conservés. Des tests ont montré qu'il suffisait de laisser tomber les trois premières semaines de simulation.

2.4 Enumération des événements possibles et des grandes lignes de leur analyse

A chaque événement est associé, dans le logiciel, un code de trois lettres. Dans cette section, les événements majeurs sont repris par ordre alphabétique de code. Leur description et les grandes lignes de l'analyse qu'ils suscitent sont expliquées.

2.4.1 Evénement 'ALP'

Description

'ALP' représente l'arrivée d'un convoi ou de la locomotive seule chez un client en réponse à des commandes de celui-ci. La locomotive peut venir livrer et/ou chercher des wagons. Cet événement se divise en deux parties: examen de la situation des voies de chargement et déclenchement des manoeuvres d'échange des wagons.

Analyse

- Déclencher l'analyse du client (Réf. événement 'RPS') afin de mettre à jour le statut des voies de chargement à l'heure de l'événement 'ALP'.

- Déterminer si les voies de chargement sont prêtes à recevoir des wagons ou si des wagons peuvent y être retirés. Pour être prêtes, les manoeuvres de chargement et de déchargement des wagons doivent être complétées.

- Si les voies sont prêtes alors les "bloquer" pour empêcher le client d'y travailler, déclencher les manoeuvres d'échange des wagons entre les voies de chargement du client et les voies du réseau, déterminer l'heure de départ de la locomotive de chez le client et ajouter l'événement 'DLP' à la liste des événements futurs à cette heure. La différence entre cette heure de départ et l'heure de l'événement 'ALP' représente le temps total de l'échange chez le client.

- Si les voies ne sont pas prêtes alors indiquer qu'il y a une locomotive en attente chez le client. Ceci permettra par la suite, lors des événements 'RPS', de réévaluer la situation des voies de chargement afin de déclencher les manoeuvres d'échange.

2.4.2 Evénement 'ARC'

Description

'ARC' représente l'arrivée d'un convoi sur les voies d'échange du port, en provenance de l'extérieur. Le moment de l'arrivée et la constitution du convoi ont été générés au préalable en accord avec les paramètres spécifiés par l'utilisateur. Une attention particulière a été apportée au mélange des wagons.

L'entrée des convois est exécutée par les locomotives des compagnies ferroviaires ce qui ne prive le port d'aucun effectif. De plus, ces manoeuvres prennent relativement peu de temps et causent peu d'interaction avec celles des locomotives du port. C'est pour ces raisons que dans le modèle l'entrée d'un convoi est considérée comme faite instantanément. Le détail des déplacements nécessaires pour placer le convoi entrant n'est donc pas simulé.

Analyse

- Identifier la compagnie ferroviaire de laquelle est issu le convoi.

- On passe en revue tous les convois des voies d'échange de la compagnie et on sort du port tous ceux qui sont prêts à sortir et qui appartiennent à la compagnie ferroviaire. Toutefois, il y a une limite sur la longueur totale du convoi que l'on peut sortir (la même que pour l'entrée de convois).

- Divers paramètres limitent l'entrée de wagons sur le réseau: limite de wagons par client, limite de wagons par compagnie ferroviaire et longueur limite d'un convoi. Chaque convoi entrant

peut donc être amputé d'une partie de ses wagons. Les wagons ainsi rejetés sont systématiquement ajoutés à chaque nouveau convoi entrant pour voir si cette fois-ci on peut les accepter.

- Chaque bloc de client est soumis aux critères ci-dessus pour acceptation. Dès qu'un bloc est rejeté, tout le reste du convoi l'est.

- On met à jour la quantité de wagons disponibles à chacun des clients et on évalue si ces nouveaux wagons permettent maintenant au client de passer une commande au port.

- On évalue si l'arrivée du convoi est suffisante pour donner du travail à une équipe de train inoccupée (s'il y en a).

2.4.3 Evénement 'DCS'

Description

'DCS' représente l'analyse des demandes des clients dans le but de former un ordre de travail pour une équipe de train qui est sans travail. Généralement cette analyse est déclenchée directement à partir des autres événements car on ne connaît pas à l'avance le moment où l'équipe deviendra libre. 'DCS' est plutôt utilisé lorsque le moment où l'équipe sera libre est connu à l'avance comme c'est le cas lorsque qu'elle débute son quart de travail.

Analyse

- On balaie la liste des commandes des clients non allouées dans le but de bâtir un ordre de travail.

2.4.4 Evénement 'DDI'

Description

'DDI' représente le moment le plus tôt auquel une équipe de train peut débuter son dîner. Dès que l'équipe amorce son quart de travail, ce moment est connu (par exemple, quatre heures après le début du quart). Il est donc ajouté à la liste des événements futurs. Il n'est cependant pas assuré que l'équipe de train puisse dîner à cet instant précis. Le modèle exige que l'équipe termine tout ordre en cours avant d'aller dîner.

Analyse

- Si l'équipe de train est libre (c.-à-d. n'exécute aucun ordre) alors elle débute immédiatement son dîner et on ajoute à la liste des événements futurs l'événement 'FDI' (fin du dîner) qui survient, par exemple, 40 minutes plus tard.

- Si l'équipe n'est pas libre alors l'équipe est dite en "état de dîner suspendu" et dès qu'elle redeviendra libre l'analyse ci-dessus sera reprise pour amorcer le dîner.

2.4.5 Evénement 'DLP'

Description

'DLP' représente le départ d'un convoi ou de la locomotive seule de chez un client. Cet événement se divise en deux parties: libération des voies bloquées durant l'exécution des manoeuvres d'échange et recherche de travail pour l'équipe de train.

Analyse

- Libérer les voies bloquées durant l'exécution des manoeuvres d'échange afin que le client puisse débuter le chargement et le déchargement des wagons.

- On balaie la liste des commandes des clients non allouées dans le but de bâtir un ordre pour l'équipe de train qui vient de terminer les échanges (Réf. Section 3.4).

2.4.6 Evénement 'DPC'

Description

'DPC' représente le moment le plus tôt auquel une équipe de train peut débuter sa pause café. La description et l'analyse de cet événement sont très semblables à celles de l'événement 'DDI'. 'DPC' est ajouté à la liste des événements futurs au moment où débute le quart. Le modèle exige que l'équipe termine l'ordre en cours avant d'aller en pause café.

Analyse

- Si l'équipe est libre alors la pause café débute et on ajoute à la liste des événements futurs l'événement 'FPC' (fin de pause café) qui survient, par exemple, 20 minutes plus tard.

- Si la pause café n'a pu avoir lieu que passé le moment le plus tôt où le dîner peut avoir lieu alors le dîner suivra immédiatement la pause café.

- Si l'équipe de train n'est pas libre alors elle est dite en état de pause café suspendue et dès qu'elle redeviendra libre, on reprendra l'analyse ci-dessus pour amorcer la pause café.

2.4.7 Evénement 'DQT'

Description

'DQT' représente le début du quart de travail d'une équipe de train. Tous les événements 'DQT' d'une semaine sont ajoutés à la liste des événements futurs au début de chaque semaine simulée, en accord avec l'horaire spécifié par l'utilisateur.

Analyse

- Calcul du moment où surviendront les événements 'DPC', 'DDI' et 'FQT' associés à ce quart de travail et leur ajout à la liste des événements futurs.

- Si le nombre maximal permis de locomotives au travail est déjà atteint (c'est un paramètre entré par l'utilisateur) alors le quart est suspendu jusqu'à ce qu'un autre quart prenne fin. Dans le cas contraire une locomotive libre est affectée à ce quart.

- On balaie la liste des commandes des clients non allouées dans le but de bâtir un ordre pour l'équipe de train (Réf. Section 3.4).

2.4.8 Evénement 'EDC'

Description

'EDC' représente l'examen à intervalle régulier des demandes des clients pour former un ordre de travail pour une équipe de travail. Cet événement est généré lorsque, durant l'examen des commandes des clients, aucun ordre n'a pu être constitué pour l'équipe faute de commandes. Dans ce cas, il faut prévoir une revision (événement 'EDC') des commandes afin de ne pas laisser l'équipe sans travail trop longtemps. Cependant entre le moment où cet événement est généré et celui où il survient, le statut de l'équipe peut avoir changé dû à d'autres événements tels que l'arrivée de convois au port. Il faut donc d'abord tester le statut de l'équipe pour savoir si elle est encore libre.

Analyse

- Si l'équipe de travail est libre passer en revue les commandes non allouées pour bâtir un ordre à l'équipe de train (Réf. Section 3.4).

- Si l'équipe n'est pas libre alors ne rien faire puisque lorsque l'ordre de travail en cours se terminera il y aura un examen des demandes des clients.

2.4.9 Evénement 'FDI'

Description

'FDI' correspond à la fin réelle du dîner d'une équipe de train. Comme il a déjà été mentionné, pour que le dîner soit entrepris, il faut que l'équipe soit libre (c.-à-d. ait complété tout ordre en cours). A la fin d'un dîner l'équipe est donc libre et on tente de lui construire un nouvel ordre.

Analyse

Passer en revue les commandes non allouées pour bâtir un ordre à l'équipe de train (Réf. Section 3.4).

2.4.10 Evénement 'FPC'

Description

'FPC' correspond à la fin réelle de la pause café d'une équipe de train. Comme pour le dîner, à la fin d'une pause café l'équipe est libre et il nous reste à tenter de lui trouver du travail.

Analyse

Passer en revue les commandes non allouées pour bâtir un ordre à l'équipe de train (Réf. Section 3.4).

2.4.11 Evénement 'FQT'

Description

'FQT' représente le moment où le quart de travail d'une équipe de train devrait prendre fin. Ce ne sera le cas que si l'équipe est libre.

Analyse

- Si l'équipe est libre alors le quart de travail concerné prend fin. Cela signifie que la locomotive utilisée devient disponible pour un nouveau quart.

2.4.12 Evénement 'JOU'

Description

'JOU' symbolise le début du jour et survient à 0h00 de chaque jour. Il permet de générer des événements qui sont indépendants des autres et qui ont lieu périodiquement.

Analyse

- On augmente de un la variable "jour".

- Ajouter à la liste des événements futurs le prochain événement 'JOU' qui a lieu dans vingt-quatre heures.

- Si on est le premier jour de la semaine, on génère et ajoute à la liste des événements futurs un ensemble d'événements qui sont indépendants des autres. Ils sont indépendants au sens où ils ne sont pas causés par d'autres et qu'on doit les provoquer pour qu'ils aient lieu.

  Ces événements sont:

  1) l'arrivée de tous les bateaux pour la semaine qui suit celle qui commence. On génère le moment d'arrivée et la charge à l'importation et à l'exportation de chaque bateau en accord avec les paramètres spécifiés par l'utilisateur du logiciel.

  2) l'arrivée de tous les convois entrant au port pour la semaine qui vient. On génère le moment d'arrivée, la constitution de chaque convoi et le mélange des wagons.

3) tous les événements 'DQT' pour la semaine à venir, en accord avec l'horaire spécifié par l'utilisateur. On imprime également les rapports statistiques de la semaine qui vient de se terminer.

- Les heures où un client est en activité varient généralement de jour en jour selon qu'il y ait ou non un bateau à quai et selon que l'on soit la semaine ou la fin de semaine. De plus, à l'intérieur de ces heures, le client ne permet pas nécessairement toujours aux locomotives du port de manoeuvrer des wagons sur ses voies de déchargement. Ces heures sont déterminées pour le jour qui s'amorce, selon les conditions qui prévalent à ce moment. Il est à noter que l'arrivée d'un bateau peut modifier certaines de ces heures au cours de la journée et que le modèle en tient compte.

- On évalue s'il y a des convois de wagons vides à faire entrer au port en ce jour.

2.4.13 Evénement 'RPS'

Description

'RPS' représente le moment (heure RPS) où l'analyse d'un client est déclenchée. Le statut du client est alors "rattrapé" jusqu'à l'heure à laquelle la simulation est rendue. Il y a un événement 'RPS' par client.

Analyse

- Déterminer si l'horloge du client est dans l'intervalle des heures d'opérations du client. Si c'est le cas alors passer à l'étape suivante. Si ce n'est pas le cas, alors avancer l'horloge du client au plus imminent des deux événements suivants: heure de début des opérations, heure RPS.

  Si le plus imminent est l'heure RPS alors remettre l'événement 'RPS' dans la liste des événements futurs et terminer l'analyse du client. Sinon, passer à l'étape suivante.
- Déterminer dans quelle période d'opération le

client se situe.

- Examiner le statut des voies de déchargement et des bateaux s'il y en a, et déterminer les manoeuvres de déchargement autorisées dans ces circonstances.

- Déterminer l'événement le plus imminent à survenir, entre l'heure actuelle de client et l'heure RPS, parmi les événements qui modifient le statut d'un client:

    . Arrivée de bateau
    . Départ de bateau
    . Prévision d'arrivée de bateau
    . Fin import prioritaire
    . Fin export prioritaire
    . Fin de post-import
    . Fin de la période d'opération du client
    . Arrivée de convois au port
    . Evénement 'RPS' qui a déclenché l'analyse

- Répartir la capacité de transbordement de l'ensemble des grues par manoeuvre autorisée, par bateau, par voies de déchargement et par compagnie ferroviaire (les wagons appartiennent à différentes compagnies ferroviaires).

- Transborder la marchandise selon les ratios de capacité déterminés jusqu'à l'heure de l'événement le plus imminent.

- Analyser le statut de la marchandise sur les voies et passer des commandes de wagons au port s'il y a lieu.

- Retourner à la première étape de l'analyse.

2.5 Fin de la simulation

La simulation se termine lorsque le nombre maximal de semaines prescrit par l'utilisateur a été simulé. Dans une simulation, on est en général intéressé à un seul paramètre et on simule autant d'itérations qu'il faut pour obtenir un intervalle de confiance satisfaisant. L'étude des opérations

ferroviaires d'un port est plus complexe et se cerne mal à l'aide d'un seul paramètre. C'est plutôt par l'examen de plusieurs statistiques bien choisies que l'on en vient à se faire une idée de la situation.

Le logiciel privilégie donc la génération de rapports périodiques qui renseignent l'utilisateur sur une foule de statistiques qui lui permettent de porter un jugement éclairé sur la performance du scénario simulé.

3. DESCRIPTION DES PRINCIPAUX MODULES DE LA SIMULATION

Tout au long de la partie 2, certains aspects de la simulation n'ont été qu'effleurés. Les solutions élaborées pour ces problèmes sont décrites dans cette partie.

3.1 Temps de déplacement des convois sur le réseau

3.1.1 Introduction

Un temps de déplacement est caractérisé par:

- une distance à parcourir entre une origine et une destination;

- une vitesse de circulation.

En général, lorsque l'on étudie le déplacement de véhicules sur un réseau (routier, aérien ou naval) on est surtout intéressé au temps mis pour le compléter. Comme le réseau reste habituellement inchangé tout au long de l'étude, il suffit de calculer une fois pour toutes, au début de l'étude, la table des distances entre toutes paires de noeuds (o, d) du réseau. En appliquant la vitesse appropriée à chacune de ces distances on connaît alors le temps de parcours.

3.1.2 Particularités du réseau ferroviaire

La procédure décrite ci-dessus ne s'applique pas intégralement à notre contexte. La raison principale réside dans la nature même d'un réseau ferroviaire:

- un tronçon occupé par un wagon est inaccessible aux autres wagons comme chemin de parcours.

- tout au long de la simulation, des wagons sont immobilisés ou en circulation, modifiant continuellement la répartition physique de ceux-ci et donc également l'ensemble des tronçons disponibles pour l'usage des autres wagons.

Premièrement, ces caractéristiques du réseau ferroviaire font en sorte que le chemin de parcours pour se rendre d'une origine à une destination varie dynamiquement en fonction de l'occupation du réseau durant le temps de déplacement. Comme plusieurs déplacements sont réalisés simultanément, il n'est pas possible de déterminer à l'avance le chemin de parcours définitif de chacun.

Deuxièmement, il faut tenir compte de la congestion, c'est-à-dire du nombre de wagons sur le réseau. Intuitivement on sait que la vitesse moyenne de déplacement entre l'origine et la destination doit être influencée par la congestion mais l'importance et la direction de cette influence sont difficiles à évaluer. Par exemple, pour une même quantité de wagons (même congestion), dépendamment de la répartition physique de ceux-ci, il peut exister différents chemins entre une origine et un destination. D'autre part, durant le parcours d'un chemin il faut tenir compte des blocages temporaires qui réduisent d'autant la vitesse moyenne. Comme plusieurs déplacements sont réalisés simultanément, il n'est pas possible de prévoir à l'avance les blocages.

3.1.3 Approximation du temps de déplacement

Les facteurs permettant d'évaluer le chemin à parcourir et les différentes vitesses de parcours durant le trajet sont trop nombreux pour en contrôler toutes les intéractions de manière efficace. Ceci empêche le calcul exact du temps de déplacement. Une méthode d'approximation a donc été développée:

- la distance est évaluée en multipliant le nombre de sections entre l'origine et la destination par la longueur d'une section.

- le temps de déplacement, obtenu en divisant la distance par la vitesse maximale permise sur les voies de circulation, est ensuite ajusté à la hausse en le divisant par un facteur tenant compte de la congestion. Ce facteur est obtenu en soustrayant de 1 le ratio du nombre de mètres

de voie occupés par des wagons sur le nombre total de mètres de voie sur le réseau.

3.2 Temps de tri

3.2.1 Introduction

Le tri fait référence à la manipulation d'un ou plusieurs convois tous situés sur un seul site de rangement. Deux cas possibles sont considérés:

1) une locomotive arrive à un site de rangement en tirant un convoi et y laisse une partie de ce convoi, sans rien y prendre.

2) une locomotive arrive à un site de rangement en tirant ou non un convoi et y prend des parties d'un ou plusieurs convois, tous situés à une même extrémité (est ou ouest) du site de rangement.

Dans les deux cas, le tri s'amorce au moment où la locomotive et son convoi ont atteint une des deux extrémités du site de rangement où a lieu le tri. Il se termine dès que la locomotive est à la tête du convoi qu'elle voulait conserver pour poursuivre sa tâche.

3.2.2 Approximation du temps de tri

Le tri est une des manoeuvres les plus communes parmi celles exécutées par une équipe de train. De plus comme le temps d'exécution n'est pas négligeable il est donc nécessaire d'en tenir compte.

Le tri peut être décomposé en une série de coupes, d'accouplements et de déplacements de wagons s'exécutant en tenant compte de la longueur, du nombre et de la localisation des voies ferrées pour manoeuvrer et du nombre de wagons à déplacer à chaque manoeuvre. Ces facteurs étant trop nombreux pour reproduire les tris de façon exacte dans la simula-

tion, le temps de tri est approximé de la façon suivante:

- le temps de coupe est déterminé en multipliant le nombre de coupes à réaliser par le temps de coupe. La quantité de coupes est estimée en choissisant un nombre aléatoire entre 0 et le quart du nombre de wagons à manoeuvrer.

- le temps d'accouplement est déterminé en multipliant le nombre d'accouplements à réaliser par le temps d'accouplement. La quantité d'accouplement est estimée en choissisant un nombre aléatoire entre 0 et le quart du nombre de wagons à manoeuvrer.

- le temps de tri est égal à la somme du temps de coupe et du temps d'accouplement.

3.3 Gestion des wagons vides

3.3.1 Comment opèrent les compagnies ferroviaires

La gestion des wagons vides est un élément important des opérations ferroviaires du port. Le contrôle en revient toutefois, aux compagnies ferroviaires. Ce sont elles qui, dans la mesure de leurs moyens, doivent veiller à ce qu'il n'en manque jamais. Suite aux consultations faites auprès des compagnies ferroviaires oeuvrant au Port de Montréal, voici en bref comment elles opèrent:

- La gestion des wagons vides est faite sur une base quotidienne.

- Au début de chaque jour, on évalue l'offre et la demande en wagons vides. L'offre est constituée de tous les wagons vides et de tous ceux qui le deviendront sous peu. Par ces derniers, on entend les wagons chargés pour l'exportation et qui deviendront vides une fois déchargés. On ne peut compter les wagons chargés pour importation car ils quitteront à destination d'une gare du continent nord-américain et ne seront pas disponibles.

La demande est évaluée à partir des bateaux à quai et représente la quantité maximale de wagons vides que peuvent demander les clients.

- Lorsque l'offre excède la demande, on s'estime en sécurité et on n'intervient pas. Dans le cas contraire, on tente de combler la différence en déplaçant des wagons vides qui sont en trop à d'autres gares du réseau de la compagnie ferroviaire pour les amener au port. On y réussit presque toujours.

3.3.2 Modélisation

Nous avons repris la même démarche que les compagnies ferroviaires. Nous supposons qu'en tout temps la compagnie ferroviaire, par des mouvements de wagons vides sur son réseau continental est en mesure d'assurer que l'offre n'est jamais inférieure à la demande.

Offre= Wagons vides sur le port (commandés ou non par un client).

+

Wagons vides dans la cour de triage de la compagnie ferroviaire (ces wagons ont été refusés par le port par manque de place sur le réseau).

+

Wagons sur le port chargés pour exportation (commandés ou non par un client).

Demande= Somme, pour tous les clients du port, de tous les wagons pouvant être commandés durant la journée. Ce nombre est égal à

MIN (A,B) où

A: marchandise d'importation non encore chargée

---

nombre d'unités de marchandise par wagon

B: quantité maximale de wagons pouvant être chargée par le client dans une journée si 100% de ses effectifs sont consacrés à cette tâche.

Nous évaluons l'offre et la demande par type de wagon et par compagnie ferroviaire. Si la demande excède l'offre nous mettons la différence dans un convoi uniquement formé de wagons vides. Il y a un tel convoi par compagnie ferroviaire. Il contient tous les types de wagons vides. L'arrivée de ce convoi a lieu au hasard dans la journée.

Notons que même si l'offre excède la demande à chaque jour, cela ne garantit pas que l'on ne manquera jamais de wagons vides. Le moment où entrera le convoi de wagons vides et le moment où les wagons chargés deviendront vides peuvent causer un manque.

3.4 Affectation du travail aux équipes de train

3.4.1 Introduction

Lorsqu'une équipe de train débute son quart, termine une pause café, un dîner ou l'exécution d'un ordre, on dit qu'elle devient libre. A moins que ce ne soit le moment de la pause café, du dîner ou simplement la fin du quart, on s'empresse de lui redonner du travail. Nous expliquons dans cette section comment nous avons modélisé cette opération.

Tout le processus commence avec les commandes passées par les clients du port ou par le port lui-même. La manière dont ces commandes sont générées fait l'objet de la section 3.6.

Une commande d'un client peut être de trois types:

- type 1: on demande au port d'apporter chez le client des wagons (chargés ou vides) mais sans en rapporter. Les paramètres à spécifier sont:

  - les voies à remplir (en totalité ou non);

- le nombre de wagons à placer sur chaque voie;

- si l'on veut des wagons chargés ou vides.

- type 2: On demande au port de venir chercher des wagons (chargés ou vides) mais sans en apporter.

  Les paramètres à spécifier sont:

  - Quelles voies vides (on ne permet pas de sortir qu'une fraction des wagons résidant sur une voie).

- type 3: On demande au port d'apporter et de rapporter des wagons de chez le client, c.-à-d. une combinaison des types un et deux.

Deux paramètres complètent les renseignements mémorisés à propos d'une commande:

- l'heure à laquelle le client passa la commande;

- la priorité rattachée à la commande, qui est celle associée au client qui l'a passée.

Une commande du port n'est que d'un seul type: on demande au port de déplacer des convois d'importation prédéterminés vers les voies d'échange de la compagnie ferroviaire concernée.

On parlera d'ordre pour désigner la tâche que l'on demande à l'équipe de train de compléter. Un ordre est défini par les commandes auxquelles il répond. Parmi toutes les commandes non allouées, on cherchera à répondre aux plus urgentes, d'où la notion de priorité introduite. Dans notre modèle, chaque ordre est constitué de la commande non allouée la plus prioritiaire.

Voyons plus en détail l'algorithme.

3.4.2 Algorithme

- Si le quart est en pause café suspendue ou en dîner suspendu alors on amorce cette pause café ou ce dîner.

- Ajout de un à la priorité de chacune des commandes non allouées. Au moment où la commande est passée sa priorité est égale à celle du client. Certains clients sont moins prioritaires que d'autres mais on ne voudrait pas que leurs commandes soient systématiquement retardées. C'est pourquoi on fait une mise à jour des priorités. A chaque nouvelle commande, on augmente de un la priorité de celles déjà passées mais non allouées. Ce faisant, une commande de basse priorité au départ devient éventuellement la plus prioritaire.

- On passe en revue les commandes non allouées. On ne considère que celles dont:

  . Aucune autre équipe de travail n'est en train de répondre à une commande pour ce même client. C'est une simplification qui n'est pas loin de la réalité et qui facilite la programmation.

  . On s'assure d'être à l'intérieur de l'intervalle de temps où le client est en opération et accepte que le port entre sur son site (si ce n'est pas une commande du port).

  . Si le quart est supposé ne travailler que dans un région du port (l'est ou l'ouest) alors on ignore les commandes provenant de l'autre région et on retient celle ayant la plus haute priorité. En cas d'égalité on choisit celle ayant été passée depuis le plus longtemps.

  Si aucune commande n'est trouvée à l'étape précédente alors l'équipe de train reste inoccupée.

- Si la commande a une portion de type 1 alors on cumule, en sommant sur les voies à remplir, les besoins en wagons par compagnie ferroviaire. Puis on amorce la recherche des convois qui nous permettent de combler les besoins.

3.5 Réseau ferroviaire

Le réseau ferroviaire est constitué d'aiguillages, de croisements, de fins de voie ferrée, de tronçons de voie ferrée et de voies ferrées. La définition de ces termes est donnée à la section 3.6 du manuel "GIRO/SOF Logiciel de simulation des opérations ferroviaires au Port de Montréal: Manuel d'utilisation".

Cette structure comporte trois tableaux interreliés (Figure 2).

3.5.1 Noeuds

Un noeud est soit un aiguillage, soit un croisement ou soit une fin de voie. Le tableau NOEUD permet de décrire les noeuds et de les relier aux tronçons.

Tableau NOEUD

- Nom : Nom du noeud tel que paramétrisé par l'utilisateur.
- Type : Aiguillage, croisement ou fin de voie.
- Section : Numéro de section de localisation sur le réseau.
- Nombre de tronçons: Nombre de tronçons attachés.

  Un aiguillage possède au maximum trois tronçons attachés, un croisement quatre et une fin de voie un.

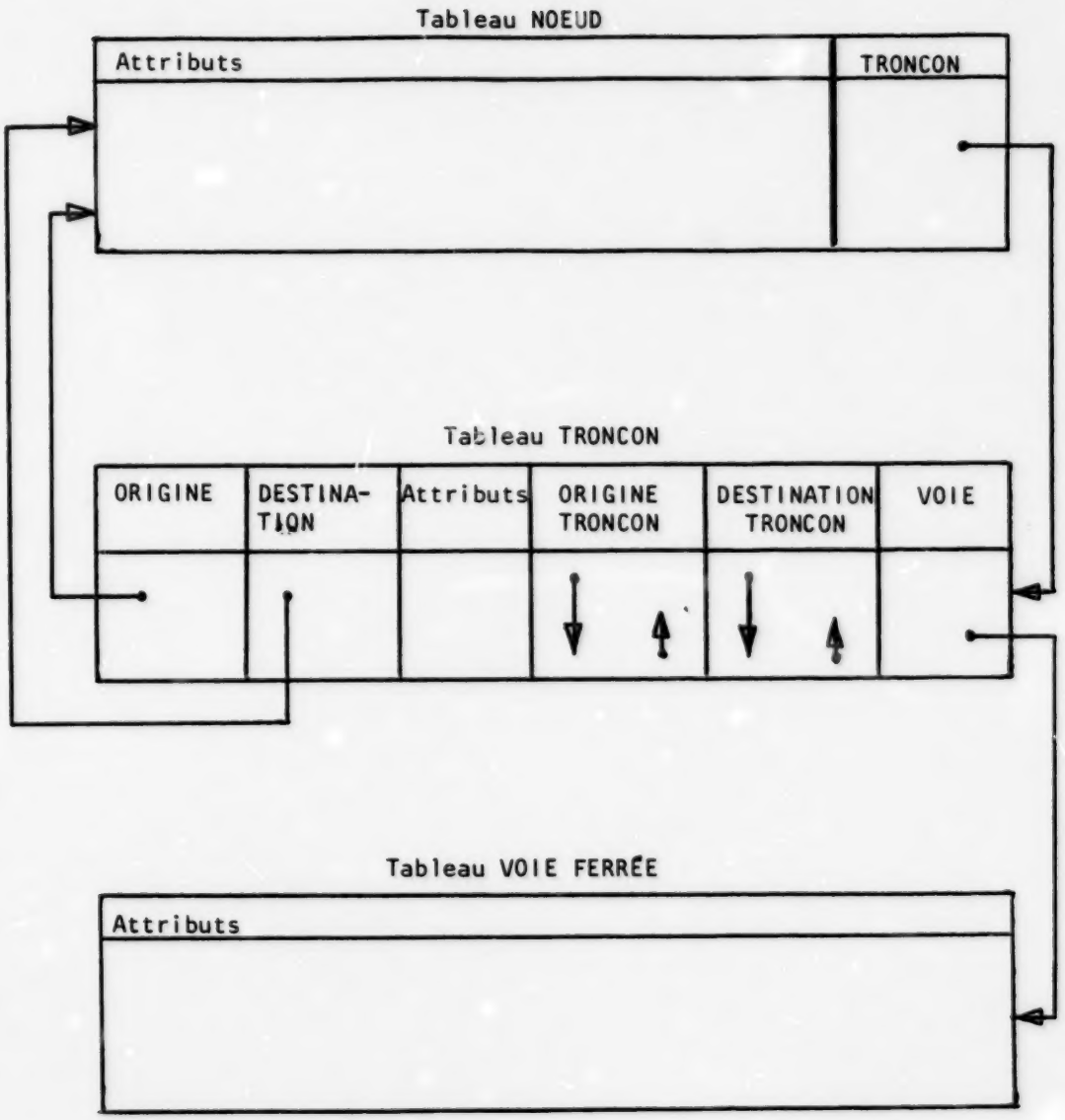


Figure 2 Structure informatique représentant le réseau ferroviaire

- Tronçon : Pointeur sur un des troncons attachés au noeud dans le tableau TRONCON.

3.5.2 Troncons

Un tronçon est défini par deux noeuds et une voie. Le tableau TRONCON permet de décrire les troncons et de relier entre eux tous les éléments du réseau ferroviaire.

Tableau TRONCON

- Origine : Pointeur sur un des noeuds du tronçon dans le tableau NOEUD.
- Destination : Pointeur sur l'autre noeud du tronçon dans le tableau NOEUD.
- Origine-tronçon : Pointeur sur un autre tronçon de même origine dans le tableau TRONCON.
- Destination-tronçon: Pointeur sur un autre tronçon de même destination dans le tableau TRONCON.
- Longueur totale : Longueur totale du tronçon en mètres entre ses deux noeuds.
- Longueur utilisable: Longueur du tronçon utilisable pour y immobiliser des wagons.
- Wagon interdit : Indique s'il est interdit d'immobiliser des wagons sur le troncon.
- Voie ferrée : Pointeur sur la voie ferrée à laquelle le troncon appartient dans le tableau VOIE FERREE.

3.5.3 Voies ferrées

Les voies ferrées sont composées d'un ou de plusieurs troncons consécutifs ou non. Le tableau VOIE FERREE permet de décrire une voie ferrée.

Tableau VOIE FERREE

- Nom : Nom de la voie ferrée tel que paramétrisé par l'utilisateur.
- Fonction : Fonction de la voie ferrée (circulation, échange, garage, support, déchargement, liaison).
- Nombre de troncons : Nombre de troncons dont est composée la voie ferrée.

3.6 Gestion des clients

Les clients sont situés sur le site du port aux abords du réseau ferroviaire qu'ils utilisent pour le transfert de la marchandise vers l'extérieur du port et inversement.

Le transfert de cette marchandise est déclenché par les commandes de wagons que les clients font au port. C'est au niveau de la nature et la séquence de ces commandes que les clients influencent les opérations ferroviaires.

Il existe deux types de client: ceux qui ont des opérations maritimes et dont la fonction est de transborder la marchandise des bateaux vers le réseau ferroviaire et inversement; et ceux qui n'en n'ont pas (également appelés industries) et dont la fonction est de produire de la marchandise sur le site du port et de la transférer sur le réseau ferroviaire souvent en retour de matière première.

Fondamentalement, ces deux types de client génèrent des commandes semblables. Cependant, la séquence de celles des clients avec opérations maritimes est beaucoup plus complexe étant donné qu'il est fonction, entre autres, de la stratégie de déchargement des bateaux et de la position de la marchandise dans les bateaux.

Cette section est écrite en fonction des clients avec opérations maritimes mais explique implicitement la gestion de ceux qui n'en n'ont pas.

3.6.1 Périodes et stratégie d'opération chez les clients

La stratégie d'opération est définie comme la méthode à suivre pour décharger et charger un bateau.

Cette stratégie est semblable chez tous les clients. Elle a d'abord pour but d'expédier le plus rapidement possible la marchandise d'importation aux destinations continentales les plus importantes (c.-à-d. le chargement de wagons d'import) pour mettre par la suite plus de ressources pour le chargement de la marchandise sur le bateau (c.-à-d. le déchargement des wagons d'export).

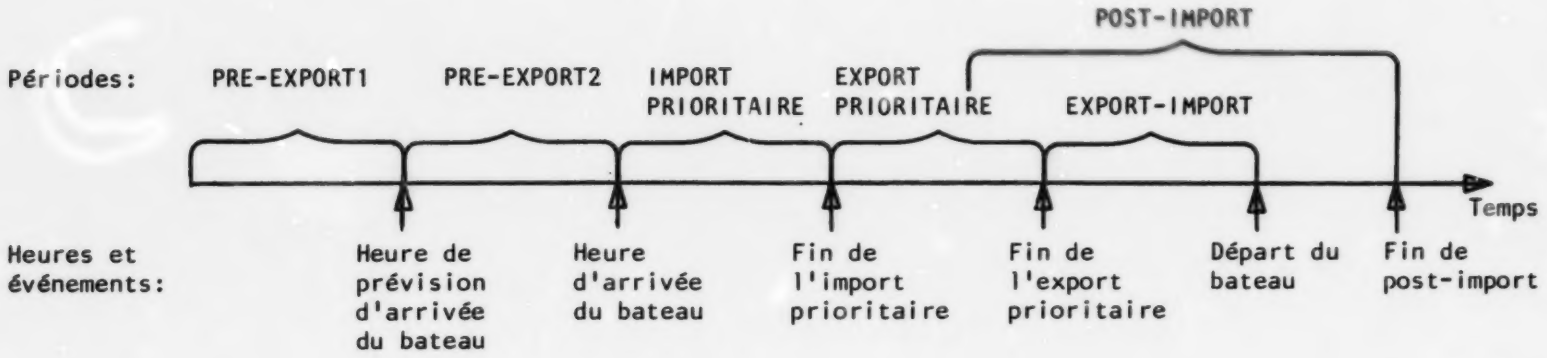
Cette stratégie a une influence directe sur la nature et la séquence des commandes de wagons et donc aussi sur l'ensemble des opérations ferroviaires. Elle doit donc être reproduite avec suffisamment de précision pour ne pas biaiser l'importance de cette influence.

Dans le modèle de simulation la stratégie d'opération est décomposée en six périodes d'opération différentes. La nature et la séquence des commandes varient selon ces périodes. Le début et la fin des périodes sont identifiés par les heures et les événements spécifiques suivants (Figure 3):

Heure d'arrivée du bateau

Heure à laquelle on débute le déchargement du bateau.

Figure 3 Périodes de la stratégie d'opération chez les clients



Heure de prévision d'arrivée du bateau

Heure d'arrivée du bateau moins 60 minutes.

Fin l'import prioritaire

Survient lorsqu'un certain pourcentage de la quantité totale de marchandise d'importation a été chargé sur les wagons.

Fin l'export prioritaire

Survient après la fin de l'import prioritaire lorsque la quantité totale d'exportation restant à faire est égale à la quantité totale d'importation restant à faire.

Départ du bateau

Survient lorsque le bateau a été complètement déchargé de son import (sur les wagons ou sur le quai) et qu'il a été rechargé de tout son export.

Fin de post-import

Survient lorsque tout l'import a été chargé sur les wagons que le bateau soit encore à quai ou non.

Quant aux six périodes constituant la stratégie, elles sont:

Pré-export 1

Période située avant l'heure de prévision d'arrivée de bateau. Durant cette période on commande des wagons d'export (wagons chargés de marchandise d'exportation) pour les déchargements sur le quai et pour les réexpédier vides sur le réseau.

Pré-export 2

Période débutant à l'heure de prévision d'arrivée du bateau et se terminant à l'heure d'arrivée du bateau. Durant cette période on

commande des wagons d'export pour les décharger sur le quai et pour les conserver en prévision de l'import qu'il y aura à faire durant la période d'import prioritaire.

Import prioritaire

Période débutant à l'arrivée du bateau et se terminant à la fin de l'import prioritaire. Durant cette période on commande des wagons d'import (wagons vides) que l'on charge de la marchandise d'importation.

Export prioritaire

Période débutant à la fin de l'import prioritaire et se terminant à la fin de l'export prioritaire ou dès que tout l'export est chargé sur le bateau. Durant cette période on commande des wagons d'export qu'on décharge et réexpédie vides sur le réseau.

Export-import

Période débutant lorsque l'export prioritaire est terminé et se terminant au départ du bateau. Durant cette période, on commande des wagons d'export qu'on décharge et qu'on recharge d'import pour les réexpédier sur le réseau.

Post-import

Période débutant dès qu'il n'y a plus d'export à faire et se terminant dès qu'il n'y a plus d'import non plus. Durant cette période, on commande des wagons d'import que l'on charge d'import pour les réexpédier sur le réseau.

3.6.2 Principe de simulation des clients

Les opérations chez les différents clients se déroulent également simultanément aux opérations ferroviaires sur le réseau. Comme les opérations des clients influencent (par les biais des commandes de wagons) les opérations ferroviaires, comme ces dernières influencent elles-mêmes (niveau de

performance du port pour la réponse au commande) les opérations des clients et comme il n'est possible de traiter qu'un seul événement à la fois dans le contexte informatique d'un processeur unique, il est nécessaire d'établir des procédures efficaces de coordination entre ces événements simultanés.

Le but du logiciel étant l'étude des opérations ferroviaires nous leur donnons priorité en ce sens que l'horloge de la simulation avance au gré de ces opérations quitte à retarder l'analyse des opérations chez les clients.

Selon cette méthode, l'heure réelle chez le client (heure du client) est toujours inférieure ou égale à l'heure de la simulation de sorte que pendant que les opérations ferroviaires se déroulent, le statut des opérations chez les clients n'est pas à date. Pour ne pas trop fausser la nature et la séquence des commandes, il ne faut pas que l'écart entre l'heure de la simulation et l'heure des clients soit trop important. Pour éviter cela, de façon périodique on "rattrape" le client (Figure 4), c'est-à-dire qu'on déclenche l'analyse du client pour amener le statut de ses opérations à l'heure de la simulation. La période de rattrapage est fixée à 30 minutes puisque généralement le statut du réseau et des clients ne change que très peu durant une telle période. Une période plus courte augmenterait considérablement le temps-ordinateur puisque les clients seraient souvent étudiés inutilement (aucune opération ou événement chez le client). Une période plus longue biaiserait la nature et la séquence des commandes.

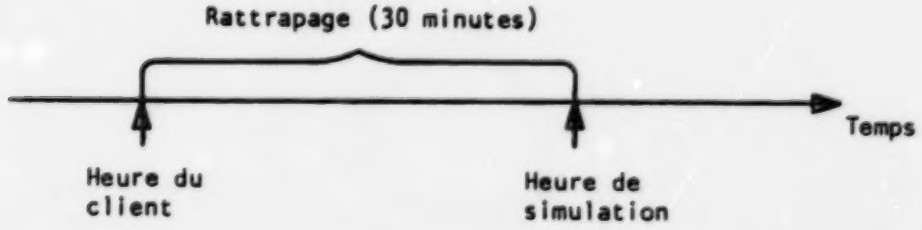


Figure 4 Méthode de rattrapage des clients

3.6.3 Manoeuvres de déchargement

Par manoeuvres de déchargement, nous entendons les six types de manoeuvre qui permettent de charger et décharger le bateau et les wagons situés sur les voies de déchargement.

Bateau-voie (BV): Déchargement de la marchandise d'import du bateau directement sur les voies.

Voie-bateau (VB): Déchargement de la marchandise d'export des voies directement sur le bateau.

Quai-voie (QV) : Chargement de la marchandise d'import du quai sur les voies.

Voie-quai (VQ) : Déchargement de la marchandise d'export des voies sur le quai.

Bateau-quai (BQ): Déchargement de la marchandise d'import du bateau sur le quai.

Quai-bateau (QB): Chargement de la marchandise d'export du quai sur le bateau.

Le choix des manoeuvres à exécuter dépend de la quantité de marchandise d'import et d'export sur le ou les bateaux à quai ou non, sur le quai et sur les voies ainsi que de la période d'opération dans laquelle le client se trouve. Ce choix est programmé de façon à éviter le plus possible le déchargement de la marchandise sur le quai afin d'éviter les doubles manoeuvres. Entre autres, s'il est permis de faire du BV, il n'est pas permis de faire du QV en même temps et s'il est permis de faire du VB, il n'est pas permis de faire du VQ en même temps.

Les volumes de marchandise pouvant être manoeuvrés dépendent du temps disponible et de la capacité des grues répartie par type de manoeuvre autorisées par bateau et par compagnie ferroviaire, de façon à reproduire fidèlement la façon de faire des clients.

3.6.4 Gestion de l'import et de l'export

La marchandise d'import et d'export est totalement contrôlée à toutes les étapes de sa manutention. Les variables suivantes sont controlées:

Au niveau des bateaux

- volume d'import restant à réaliser par bateau;
- volume d'export restant à réaliser par bateau.

Au niveau du quai

- volume d'import à quai par bateau;
- volume d'export à quai par bateau.

Au niveau des voies de chargement

- volume d'import réalisé par bateau par compagnie ferroviaire par voie;

- volume d'export réalisé par bateau par compagnie ferroviaire par voie.

Au niveau du réseau ferroviaire

- volume d'import réalisé par bateau par compagnie ferroviaire;

- volume d'export réalisé par bateau par compagnie ferroviaire.

- volume d'export disponible par bateau par compagnie ferroviaire.

3.6.5 Gestion des voies de chargement

Les voies de chargement représentent l'interface du client avec le réseau ferroviaire. Chaque client possède une ou plusieurs voies. Comme les clients peuvent faire affaire avec plus d'une compagnie ferroviaire, ils dédient un certain nombre de voies à chacun ou bien les laissent pour utilisation commune. Le logiciel permet de faire ces réservations de voies qui influencent profondément la nature et la séquence des commandes.

Voie en export

Lorsque des wagons contenant de la marchandise d'exportation sont livrés sur une voie, la voie est dite en export. Sur ce genre de voie on connaît à tout moment le volume d'export dédié à chaque bateau teau et réparti par compagnie ferroviaire. La voie demeure en export jusqu'au moment où tout l'export est déchargé. A ce moment, elle devient en import.

Voie en import

Lorsque des wagons vides sont livrés sur une voie ou lorsque l'export de cette voie est complètement déchargé, la voie est dite en import. Sur ce genre de voie on connaît à tout moment le volume d'import chargé par bateau par compagnie ferroviaire. La voie demeure en import jusqu'au moment où les wagons qui l'occupent sont retirés. A ce moment, elle devient vide.

Voie vide

Voie qui ne contient aucun wagon.

Le statut des voies de chargement est constamment mis à jour durant la simulation puisqu'il permet d'identifier les manoeuvres de chargement autorisées.

3.6.6. Commande de wagons

Les commandes consistent à commander des wagons d'export ou des wagons d'import pour livraison sur les voies de chargement. Elles consistent également à demander au port de retirer des wagons de ces voies.

Entrée de wagons vides : Consiste à commander des wagons vides.

Entrée de wagons chargés: Consiste à commander des wagons d'export.

Sortie de wagons vides : Consiste à demander la sortie de wagons vides.

Sortie de wagons chargés:	Consiste à demander la sortie de wagons d'import chargés.
Sortie de wagons vides et entrée de wagons chargés :	Consiste à demander la sortie de wagons vides et l'entrée de wagons d'export.
Sortie de wagons chargés: et entrée de wagons vides	Consiste à demander la sortie de wagons d'import chargés et l'entrée de wagons vides.
Sortie de wagons chargés: et entrée de wagons chargés	Consiste à demander la sortie de wagons d'import chargés et l'entrée de wagons d'export.

La nature et le moment des commandes dépendent de la quantité de marchandise d'import et d'export sur le ou les bateaux à quai ou non, sur le quai et sur les voies ainsi que de la période d'opération dans laquelle le client se trouve. La commande d'une voie est passée lorsque les trois conditions suivantes sont remplies:

- le volume d'export déchargé d'une voie en export ou le volume d'import chargé d'une voie en import a atteint le seuil de commande paramétrisé;

- la quantité de wagons d'export ou d'import à commander est disponible sur le réseau ferroviaire;

- le nombre de voies prêtes à commander est égal ou supérieur au nombre minimal de voies à commander simultanément paramétrisé. Cette condition est relaxée lorsqu'il ne reste plus assez d'export ou d'import à réaliser pour la satisfaire.

Lorsqu'une commande n'est pas réalisable, la stratégie d'opération chez le client est ajustée en conséquence afin d'entreprendre des opérations alternatives.

3.7 Génération de bateaux

Par génération de bateaux, nous entendons la détermination des heures d'arrivée des bateaux ainsi que la détermination de leurs volumes de marchandise pour importation et pour exportation.

Ce sont des événements qui déclenchent l'ensemble de l'activité ferroviaire au port, ils sont calculés au début de chaque itération simulée.

3.7.1 Heure d'arrivée

L'heure d'arrivée d'un bateau dans la simulation est déterminée par les paramètres suivants:

FREQ : Fréquence hebdomadaire d'arrivée du bateau. C'est-à-dire, le bateau vient à toutes les x semaines.

JOURA : Jour prévu pour l'arrivée du bateau dans la semaine.

RETARD: Probabilité observée du nombre de jours de retard dans la période annuelle considérée pour la simulation.

HRAMY : Heure moyenne d'arrivée observée dans le jour JOURA.

HRAEC : Nombre de minutes d'écart type observé pour l'heure HRAMY.

Méthode de calcul:

Les bateaux dont l'arrivée est prévue pour l'itération I sont générés au début de l'itération I-1 afin que les wagons contenant la marchandise d'exportation dédiée à ces bateaux puissent commencer à arriver dès l'itération I-1.

Au début de l'itération I-1 on réalise donc les étapes suivantes pour chacun des bateaux décrits pour les clients avec opérations maritimes.

1) On vérifie que le bateau est prévu pour l'itération I (FREQ). Sinon alors fin.

2) On calcule s'il doit y avoir retard par rapport au jour d'arrivée prévu en choisissant un nombre aléatoire dans l'intervalle (0,1). Si le nombre est inférieur ou égal à la probabilité de retard RETARD alors il y a un retard. Sinon aller à 4.

3) On calcule le nombre de jours de retard en choisissant un nombre aléatoire entre 1 et (1 + 6 * RETARD).

4) On calcule l'heure d'arrivée dans la journée d'arrivée selon une loi normale, tronquée entre 0h00 et 24h00, de moyenne HRAMY et d'écart type HRAEC.

5) On calcule l'heure d'arrivée dans la simulation en cumulant les minutes du début de la simulation jusqu'à l'heure d'arrivée calculée dans la journée d'arrivée.

3.7.2 Volumes de marchandise

VOLIMY: Volume moyen de marchandise d'import observé.

VOLIEC: Ecart type observé sur VOLIMY.

VOLEMY: Volume moyen de marchandise d'export observé.

VOLEEC: Ecart type observé sur VOLEMY.

RAIL : Pourcentage de marchandise transitant par rail.

CAPMX : Capacité maximale du bateau.

COFVOL: Pourcentage d'import et d'export dédié à chaque compagnie ferroviaire.

Méthode de calcul:

1) Le volume total d'import (d'export) du bateau est calculé grâce à une loi normale, tronquée entre 1 et CAPMX, de moyenne VOLIMY (VOLEMY) et d'écart type VOLIEC (VOLEEC).

2) Le volume total d'import (d'export) par rail est calculé en multipliant le volume calculé en 1 par RAIL.

3) Le volume total d'import (d'export) par rail est réparti entre les compagnies ferroviaires grâce à COFVOL.

3.8 Génération de convois d'export

La génération de convois d'export consiste à construire des convois de wagons contenant de la marchandise d'exportation destinée aux clients et à générer leurs heures d'arrivée sur le réseau durant la simulation. La composition des convois et le mélange des wagons dans les convois doivent être conformes à la réalité étant donné que le niveau de mélange influence grandement les temps d'opération ferroviaire nécessaire pour trier, couper, accoupler et localiser les wagons.

Dans la procédure de génération de convois décrite dans cette section, la composition et le mélange des convois sont contrôlés en partie par les paramètres que l'utilisateur fournis au logiciel et en partie par le hasard grâce à l'utilisation de nombres aléatoires. Cette procédure reflète la réalité puisque la composition et le mélange des vrais convois, entrés au port par les compagnies ferroviaires, ne sont jamais identiques et ne peuvent pas être prévus. Ils découlent des avances et des retards des convois sur le continent, des manoeuvres qui sont faites sur ces convois dans les gares de triage rencontrées et du fait que les compagnies ferroviaires ne trient pas leur convois en fonction des besoins du port. L'élément de hasard inclus dans la procédure simule ces faits.

Cette génération est réalisée au début de chaque itération immédiatement après la génération des ba-

teaux puisqu'il y a relation entre les deux. En effet, la génération de bateaux pour l'itération I induit l'accumulation de wagons d'export devant arrivés durant les itérations I-1, I et I+1 (Figure 5).

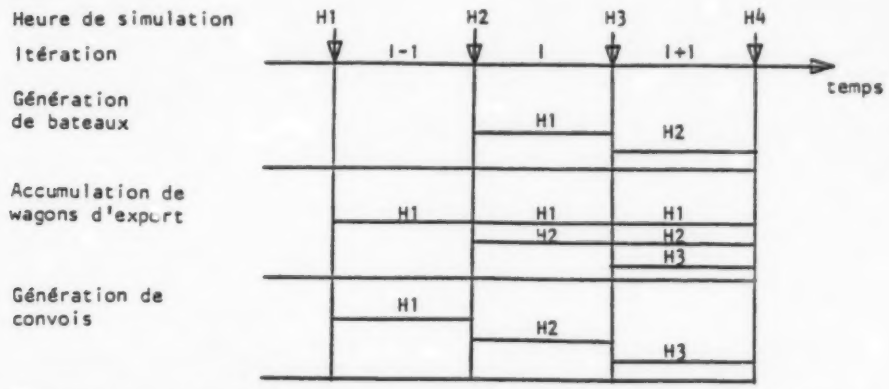


Figure 5 Relation entre la génération des bateaux et la répartition des wagons d'export

La génération de convois est réalisée de façon indépendante pour chaque compagnie ferroviaire et pour chaque jour de la semaine en suivant les étapes décrites aux paragraphes suivants.

Le mot convoi et le mot train représentent la même entité. On trouve le mot train dans les écrans de la partie GESTION DES SCENARIOS du logiciel puisque ce terme est mieux connu des utilisateurs. En ce qui concerne le modèle de simulation on préfère employer le mot convoi. La description des paramètres relatifs à la génération de convois d'export sont décrits à la section 3.10 du manuel "GIRO/SOF Logiciel de simulation opérations ferroviaires au Port de Montréal: Manuel d'utilisation".

3.8.1. Nombre de convois et caractéristiques

La première étape consiste à déterminer combien de convois sont prévus pour la compagnie ferroviaire dans la journée.

On génère d'abord un convoi pour chaque convoi régulier décrit puis un certain nombre de convois extras.

Nombre de convois extra

FREQC(n): Fréquences d'occurance journalière observées pour chaque quantité de convois extras n = 0.1.2.3.4.5 +.

Méthode de calcul:

Le nombre de convois extras est choisi au hasard (nombre aléatoire) selon les probabilités observées dans FREQC(n). Un maximum de cinq convois extras est généré par journée.

Nombre de wagons par convoi

MAXWAG : Nombre maximum de wagons dans un convoi.

WAGMY : Nombre moyen de wagons observé pour le convoi.

WAGEC : Ecart type observé pour WAGWY.
TOTWAG : Total des wagons d'export de l'ensemble des clients dans la journée pour la compagnie ferroviaire.

Méthode de calcul:

1) Le nombre de wagons de chaque convoi est déterminé à l'aide d'une loi normale, tronquée entre 1 et MAXWAG, de moyenne WAGWY et d'écart type WAGEC.

2) On somme les quantités déterminées de wagons de l'ensemble des convois et on compare la somme à TOTWAG. Si elle est inférieure, on répartit la différence entre les convois au prorata du nombre de wagons de chaque convoi. Si elle est supérieure, on départit la différence de la même façon.

Heure d'Arrivée des convois

HRAMY: Heure moyenne d'arrivée observée pour le convoi.

HRAEC: Nombre de minutes d'écart type observé pour l'heure HRAMY.

Méthode de calcul:

On calcule l'heure d'arrivée dans la journée à l'aide d'une loi normale, tronquée entre 0h00 et 24h00, de moyenne HRAMY et d'écart type HRAEC.

3.8.2 Répartition des clients dans les convois

La deuxième étape consiste à déterminer dans combien de convois les wagons de chaque client seront répartis.

FREQCC(m,n): Tableau indiquant pour chaque nombre de wagons total m d'un client la probabilité observée d'avoir ses wagons répartis dans n convois
n = 1,2,3,4,5 +.

Méthode de calcul:

1) Le nombre de convois est calculé au hasard (nombre aléatoire) selon les probabilités observées FREQCC(m,n) correspondant au nombre de wagons m du client. Un client peut être réparti dans un maximum de cinq convois.

2) Soit c le nombre de convois déterminé pour le client. On choisit c convois au hasard au prorata du nombre de wagons dans chacun des convois déterminés au paragraphe 3.8.1. Un convoi est choisi une seule fois pour un même client.

3.8.3 Répartition des wagons

La troisième étape consiste à répartir les wagons de chaque client dans les convois choisis tout en respectant le nombre de wagons total déterminés pour chaque convoi.

Méthode de calcul:

1) On alloue les clients de façon à ce que ceux qui ont le moins de wagons à placer dans le moins de convois soient traités en premier.

2) Traiter les clients dans l'ordre déterminé en 1.

3) Répartir les wagons du client dans les convois choisis au prorata du nombre de wagons de chaque convoi.

3.8.4. Déterminer le nombre de blocs-clients par convoi

La quatrième étape consiste à déterminer combien de blocs-clients chaque convoi doit contenir.

Méthode de calcul:

1) Le nombre de blocs-clients est égal ou supérieur au nombre de clients qui ont des wagons dans le convoi. La borne supérieure de ce nombre est calculée de la façon suivante:

Soit TOTWAG: La somme de tous les wagons de tous les clients dans le convoi.

MAXWAG: Le nombre de wagons du client qui a le plus de wagons dans le convoi.

alors

$$\text{Borne supérieure} = \begin{cases} 1 + 2\ (\text{TOTWAG} - \text{MAXWAG}), \\ \quad \text{si } 2(\text{MAXWAG}) \geqslant 1 + \text{TOTWAG} \\ \text{TOTWAG}, \text{si } 2(\text{MAXWAG}) \leqslant 1 + \text{TOTWAG} \end{cases}$$

2) Choisir au hasard un nombre de blocs entre les bornes inférieure et supérieure.

3.8.5. Construction des convois

La dernière étape consiste à construire les convois en générant un à un chacun de ses blocs-clients et de ses sous blocs-clients et en les intégrant à la structure d'informatique des convois.

Méthode de construction:

La méthode consiste à créer, en premier, les blocs-clients des clients avec le plus de wagons dans le convoi en alternant entre ces clients. Cette façon reproduit le fait que plus un client a de wagons dans un convoi, plus il a de chance d'avoir un plus grand nombre de blocs qu'un client qui en a moins.

4. CONCLUSIONS

La simulation des opérations ferroviaires, dans un contexte portuaire comme celui du Port de Montréal, est une tâche très complexe étant donné la forte interrelation entre les événements. Pour que la simulation fournisse des résultats valables, il est nécessaire de décomposer les événements à leur plus bas niveau et de coordonner leur réalisation de façon précise. Le modèle de simulation du logiciel GIRO/SOF a donc été développé sur ce principe. Il intègre des éléments innovateurs dans le domaine de la simulation ferroviaire:

i) très grand souci du détail dans la réalisation des événements afin de minimiser les biais dans les temps d'opération et dans les interrelations entre les événements;

ii) intégration de tous les éléments influençant les opérations ferroviaires: structure du réseau ferroviaire, quarts de travail, locomotives, wagons, compagnies ferroviaires desservant le port, client portuaires;

iii) manoeuvres ferroviaires réalistes: calcul du temps de déplacement et de calcul du temps de tris des convois qui tiennent compte de la longueur des convois, de l'espace disponible, de la configuration du réseau et des déplacements simultanés des autres convois;

iv) manoeuvres de chargement et de déchargement de la marchandise basées sur la stratégie employée par les clients portuaires. Cela permet de générer des commandes de wagons réalistes au niveau des volumes et des types de wagons et des moments où les commandes sont faites;

v) module de contrôle des événements qui reproduit les méthodes de gestion utilisées au port et l'expérience des chefs de cour;

vi) génération de bateaux et de convois arrivant et sortant du port basée sur les statistiques observées.

Tous ces éléments combinés au module de gestion des scénarios font du logiciel GIRO/SOF un outil de planification d'opérations ferroviaires dans un port. Il permet de simuler un très grand nombre de scénarios avec facilité et précision.